

Fabrication of All-Nb Josephson Junction Array Using the Self-Aligning and Reactive Ion Etching Technique

Hyun Kwon Hong^{*, a}, Kyu-Tea Kim^{+, b}, Se Il Park^{+, b}, Kie-Young Lee^a

^a Chungbuk National University, Chongju, Korea

^b Korea Research Institute of Standards and Science, Deajeon, Korea

Self-Aligning 기술과 반응성 이온 식각 기술로 제작된 Nb 조셉슨 접합 어레이의 특성

홍현권^{*, a}, 김규태^{+, b}, 박세일^{+, b}, 이기영^a

Abstract

Josephson junction arrays were fabricated by DC magnetron sputtering, self-aligning and reactive ion etching technique. The Al native oxide, formed by thermal oxidation, was used as the tunneling barrier of Nb/Al-Al₂O₃/Nb trilayer. The arrays have 2,000 Josephson junctions with the area of 14 $\mu\text{m} \times 46 \mu\text{m}$. The gap voltages were in the range of 2.5 ~ 2.6 mV and the spread of critical current was $\pm 11 \sim 14 \%$. When operated at 70 ~ 94 GHz, the arrays generated zero-crossing steps up to 2.1 ~ 2.4 V. To improve transmission of microwave power and prevent diffusion of oxygen into Nb ground-plane while depositing SiO₂ dielectric, we applied a plasma nitridation process to the Nb ground-plane. The microwave power was well propagated in Josephson junction arrays with nitridation. The difference in microwave transmission can be interpreted by the surface impedance change depending on nitridation.

Keywords: Josephson junction array, voltage standard, zero-crossing steps, plasma nitridation

I. 서론

최초의 조셉슨 전압표준기가 1~2 개 접합에 약 10 GHz 정도의 마이크로파를 가해서 얻어지는 약 1 mV 정도의 Shapiro 스텝에 기초하던 것과는 달리 현재 조셉슨 전압표준기는 M. T. Levinsen 등에 의해서 제안된 영전류 통과 스텝 (zero crossing step) [1]을 이용하여 1,500 ~

20,000 개 접합 직렬 어레이로부터 1 ~ 10 V의 조셉슨 전압을 얻고 있다. 이러한 발전 뒤에는 finline antenna 및 microstripline의 사용을 통한 마이크로파 수신 및 전송문제의 해결 [2], 우수한 재현성과 낮은 누설전류 그리고 액체 헬륨 온도와 상온 사이에 thermal cycling에 잘 견디어 낼 수 있는 Nb/Al-Al₂O₃/Nb 조셉슨 접합의 개발이 크게 공헌하였다 [3].

지금까지 개발된 고품질 조셉슨 접합의 제작방식 [3]-[6]을 간단히 살펴보면, 먼저 하부 Nb 전극 (base electrode)을 증착시키고, 터널장벽으로 사용되는 Al 박막을 증착시킨 후 Al 표

*Corresponding author.

e-mail: skyhkh@hanmir.com, lhrh@cbucc.chungbuk.ac.kr

+email: ktkim@kriss.re.kr, seilpark@kriss.re.kr

면을 고순도 산소분위기에서 열산화시킨다. 그리고, 그 박막 위에 상부 Nb 전극 (counter electrode)을 증착시켜 삼층구조 (trilayer)를 형성한다. 그리고, 어레이 구조를 형성하기 위해 SNEP (selective niobium etching process) [4]와 SNAP (selective niobium anodization process) [5] 그리고 SAC (self-aligned contact) [6] 등의 공정기술이 사용되었다.

본 논문에서는 self-aligning 기술과 반응성이온 식각 기술로 제작한 조셉슨 접합 어레이의 I - V 특성을 제시할 것이다. 그리고, 마이크로파의 전송 특성을 개선하기 위해 시도된 Nb 박막 (ground-plane)의 질화처리에 의한 마이크로파 전송특성의 개선 효과를 보고하고자 한다.

II. 회로 설계

1. 단일 접합 설계

외부에서 인가된 마이크로파 주파수 (ω_{rf})에 대해서 위상구속의 안정성과 큰 스텝크기를 갖는 영전류 통과 스텝을 얻기 위해서는 임계전류밀도 (J_c)와 접합길이 (l) 그리고 접합폭 (w)의 최적값을 선택해야 한다. Nb/Al₂O₃/Nb 조셉슨 접합에서 설계변수의 최적값을 알기 위해서는 단위면적당 접합 커패시턴스 (C_s)와 Nb 박막의 London 투과깊이 (λ_L)의 값을 정확히 알아야만 한다. 이제까지 C_s 값으로 6 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 을 사용하였는데 [7],[8], 본 논문에서는 Maezawa 등이 [9] SQUID의 공진 전압스텝으로부터 0.1~18 kA/cm^2 범위에서 J_c 와 C_s 의 관계를 실험적으로 조사한 Eq. (1)을 사용하였다.

$$\frac{1}{C_s} = 0.2 - 0.043 \log_{10} J_c \quad (1)$$

여기서 C_s 는 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 이고, J_c 는 kA/cm^2 이다. 한국 표준과학연구원에서 기개발된 210개 조셉슨 접합 어레이 [7]와 2520개 조셉슨 접합 어레이 [8]의 J_c 는 34 A/cm^2 와 37 A/cm^2 을 사용하였다. 이 J_c 를 Eq. (1)에 대입하면 3.8~3.82 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 이다.

한편, Nb 전극의 London 투과깊이 (λ_L)는 다음과 같이 Fiske 공진주파수 (f_F)로부터 구하여 설계에 활용하였다. 즉, 접합크기가 22 $\mu\text{m} \times 44$

μm 에 대해 관측된 0.26 mV의 Fiske step의 값 [8]을 Eq. (2)와 Eq. (3)에 적용하면 λ_L 은 대략 80 nm가 얻어진다.

$$V_1 = \frac{h}{2e} f_{F1} \quad (2)$$

$$d = \lambda_{L1} + \lambda_{L2} + t = \frac{1}{4\mu_0 C_s (f_F w)^2} \quad (3)$$

여기서, V_1 은 첫번째 Fiske step이 나타난 전압이고, w 은 마이크로파 전류가 흐르는 방향에 수직방향인 접합폭, λ_{L1} 과 λ_{L2} 는 각기 상하부 Nb 전극의 London 투과깊이, μ_0 는 진공의 투자율이다.

1-1. 임계전류밀도

참고문헌 [10]에 의하면 외부에서 인가된 마이크로파 주파수 (f_{rf})는 플라즈마 주파수 (f_p)보다 3배 이상 커야 혼돈 (chaos)을 피할 수 있다고 보고하고 있다. 하지만, 본 연구팀에서 앞서 개발한 0.1 V 조셉슨 접합 어레이의 실험결과로부터 [7] f_{rf}/f_p 가 2.5 배 이상이면 충분히 혼돈을 피할 수 있는 것으로 조사되었다. 즉, $f_{rf}/f_p \geq 2.5$ 이면 안정한 조건을 만족하므로 최대 임계전류밀도 ($J_{c\text{max}}$)는 Eq. (4)로 표현할 수 있다.

$$J_{c\text{max}} = \frac{\pi h C_s}{e} \times \frac{1}{2.5^2} \times f_{rf}^2 \quad (4)$$

그리고, 조셉슨 접합 어레이의 단위면적당 커패시턴스 (C_s)를 3.8 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 로 하고, 70 GHz의 마이크로파에서 혼돈을 피할 수 있는 최대 임계전류밀도 ($J_{c\text{max}}$)를 계산하면 대략 39 A/cm^2 이 된다.

1-2. 접합길이

마이크로파 전류로 생긴 자기장에 의한 스텝폭의 감소를 피하기 위해서는 마이크로파 전류가 흐르는 방향인 접합길이 (l)는 Eq. (5)을 만족해야 한다 [11].

$$l \leq \sqrt{\frac{6J_c}{\omega_{rf}C_sV_n}} \lambda_J \quad (5)$$

여기서, λ_J 는 조셉슨 투과깊이로서

$$\lambda_J = \sqrt{\frac{\hbar}{2e\mu_0dJ_c}} \quad (6)$$

로 주어지며 그 값은 약 $63 \mu\text{m}$ 가 된다. 따라서, Eq. (5)로부터 70 GHz의 마이크로파에 대한 최대 접합길이 (l_{max})는 대략 $24 \mu\text{m}$ 가 된다.

2-3. 접합폭

$\omega_{rf} < \omega_J$ 일 때 위상의 변화를 일으키는 Fiske 공진이 나타나므로 마이크로파 전류의 방향과 수직 방향인 접합폭은 기하학적인 진동모드의 절반보다 작아야만 한다. 즉, 접합폭은 Eq. (7)을 만족해야 한다. 따라서, 최대 접합폭 (w_{max})은 대략 $79 \mu\text{m}$ 가 된다.

$$w \leq \frac{1}{2f_{rf}\sqrt{\mu_0dC_s}} \quad (7)$$

앞에 서술한 조건들로부터 70 GHz 범위에서 만족시키는 단일 접합의 설계 변수들을 $J_c=39 \text{ A/cm}^2$, $l=14 \mu\text{m}$ 그리고 $w=46 \mu\text{m}$ 로 정했다.

2. 조셉슨 접합 어레이 설계

단일 접합 설계로부터 어레이 설계로 전환할 때 어려움은 직렬로 연결된 수많은 접합들이 단일 접합과 같은 특성을 나타내야 한다는 것이다. 즉, 이상적인 어레이에서는 모든 접합들이 같은 면적과 같은 임계전류를 가지고 있으며 같은 마이크로파를 수신하고 있다. 만일, 접합들마다 임계전류가 다르거나 마이크로파 수신이 다르다면 얻을 수 있는 최대 스텝 전압이 감소하는 효과를 준다.

2-1. Finline antenna

E-Band 도파관의 임피던스를 stripline의 임피던스로 전환시켜주는 finline antenna의 곡선은 $\exp(\alpha_1x)$ 를 따른다 [7]. 여기서, α_1 가 $0.0006 \mu\text{m}^{-1}$

인 곡선과 $0.0036 \mu\text{m}^{-1}$ 인 곡선이고, 총 길이는 6.3 mm이다.

2-2. 분기와 matched load

마이크로파는 2^n 으로 병렬로 분기되고, 분기별로 연결된 터널접합의 수는 $N/2^n$ 으로 결정된다 (n 은 양의 정수, N 은 총 터널접합의 수). 그리고, 각 분기 종단에 흐르는 마이크로파를 개방회로부터 반사 없이 흡수시켜주는 역할을 하는 matched load가 2^n 개 필요하다 [12].

2-3. Stripline의 매질로 사용되는 절연막 두께와 접합간의 중심거리

Niemeyer 등 [2],[13]이 최초로 소개한 설계양식에 따르면 직렬 조셉슨 접합들은 Eq. (8)의 조건에서 이상적인 전송선처럼 행동한다 [11].

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C}} \ll f_{rf} \ll \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C_0}} \quad (8)$$

여기서, L_0 와 C_0 는 접합들간의 중심거리에서 stripline과 ground-plane 사이의 인덕턴스와 커패시턴스이고, C 는 접합 커패시턴스이다.

초전도체의 London 투과깊이를 무시하면 $L_0=\mu_0rs/w$ 와 $C_0=\epsilon_r\epsilon_0rw/s$ 이다. 여기서 r 은 접합간의 중심거리이고, s 는 stripline의 매질로 사용되는 절연막 두께이다. 위 근사식을 사용하여 Eq. (8)의 $f_{rf} \ll 1/2\pi(L_0C_0)^{1/2}$ 조건에서 Eq. (9)을 얻을 수 있고, $1/2\pi(L_0C)^{1/2} \ll f_{rf}$ 조건에서 Eq. (10)을 얻을 수 있다.

$$r \ll \frac{1}{2\pi f_{rf} \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0}} \quad (9)$$

$$s \gg \frac{w}{\mu_0 r (2\pi f_{rf})^2 C} \quad (10)$$

만일, SiO_2 의 유전상수 (ϵ_r)를 3.5로 가정하고, 70 GHz의 마이크로파를 적용했을 때 최대 중심사이거리 (r_{max})는 대략 $364 \mu\text{m}$ 이다. 그리고, 적절한 r 값을 $20 \mu\text{m}$ 라고 했을 때 최소 절연막 두께 (s_{min})은 대략 $0.4 \mu\text{m}$ 이다. 절연막 두께 (s)를 $1 \mu\text{m}$ 로 선택하면 43 GHz에서 1275 GHz 범위에서

사용할 수 있다.

Fig. 1은 2,000 개 조셉슨 접합 어레이의 구조를 나타낸 것이다. 직렬로 연결된 조셉슨 접합에 마이크로파를 효율적으로 수신하기 위한 finline antenna와 접합을 통과한 마이크로파를 반사 없이 흡수시켜주는 resistive termination로 구성되어 있다. 그리고, finline antenna에서 수신된 마이크로파는 2분기로 나누어져 각각 1,000 개가 직렬로 연결된 series array에 전달된다. 그리고, Table 1은 본 논문에서 사용된 조셉슨 접합 어레이의 설계 변수들을 정리한 것이다.

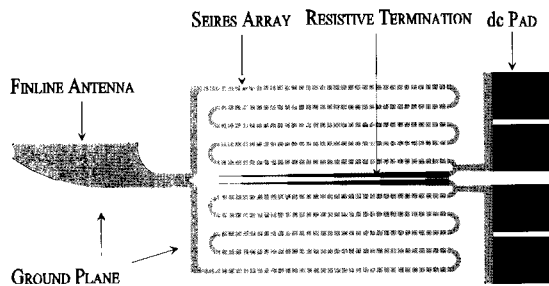


Fig. 1. Layout of the designed Josephson array of 2,000 junctions.

Table 1. Design parameters for 2,000 Josephson junctions array.

Parameter	Symbol	Design value
Characteristic capacitance	C_s	$3.8 \mu\text{F}/\text{cm}^2$
Operation frequency	f_f	70 GHz
Critical current density	J_c	$39 \text{ A}/\text{cm}^2$
Plasma frequency	f_p	28 GHz
Junction length	l	$14 \mu\text{m}$
Junction width	w	$46 \mu\text{m}$
London penetration depth	λ_{Nb}	80 nm (from Fiske step)
Lowest resonance mode	f_F	126 GHz
Dielectric thickness	s	$1 \mu\text{m}$

III. 측정

현재 조셉슨 접합 어레이의 측정 시스템은 Fig. 2에 나타낸 것처럼 크게 microwave source 부분과 cryogenic unit 부분, 그리고 전류전원 (bias controller) 부분으로 구성되어 있다. microwave source 부분은 70 GHz~90 GHz를 발생시키는 Gunn diode oscillator와 synthesizer (HP 3325B), 그리고 12-digit source locking counter (EIP 578B)로 구성되어 있다. cryogenic unit 부분은 100 L LHe dewar 와 RF interference filter가 설치되어 있는 probe로 구성되어 있다.

측정방법은 완성된 조셉슨 접합 어레이를 probe에 장착하여 액체 헬륨 (4.2 K)이 들어 있는 dewar에 넣어 전류전원과 Gunn diode oscillator를 사용하여 dc와 ac 신호를 소자에 인가한다. 그리고, Gunn diode oscillator에서 발생한 신호의 일부분은 10:1 directional coupler에 의해 분기되어 12-digit source locking counter로 보내져 위상구속 주파수와와의 차이만큼 위상구속 출력신호를 Gunn diode를 구동시키는

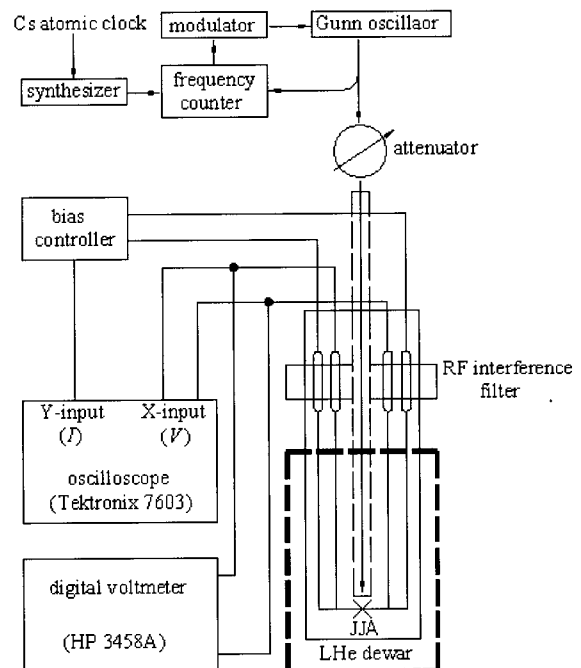


Fig. 2. Block diagram of the measurement system for monitoring I - V characteristics of the Josephson junction array.

modulator에 보냄으로서 안정한 귀환루프 (feedback loop)를 형성시키게 된다.

Source locking counter의 reference 신호는 주파수 가변 분해능이 높은 synthesizer를 사용하고, 이 synthesizer의 time base로 안정도가 높은 Cs 원자시계에서 공급되는 1 Mhz 기준신호를 사용한다.

여기서, 발생된 조셉슨 접합 어레이의 신호는 oscilloscope (Tektronix 7603)를 통해 나타나고, digital voltmeter (HP 3458A)로 발생된 스텝의 전압을 측정한다.

VI. 결 과

1. 조셉슨 접합 어레이의 전기적 특성

Fig. 3는 70~90 GHz의 마이크로파가 인가됐을 때 1 V 이상의 스텝이 나타난 소자들에 대해서 실온 저항값에 대한 임계전류밀도를 조사한 것이다. 본 연구에서 조사된 최적 임계전류밀도는 29~31 A/cm²로 조사되었고, 그때 실온 저항값은 14.2~15 kΩ 범위 내에 있었다.

Fig. 4는 질소 플라즈마 처리를 한 2,000 개 조셉슨 접합 어레이에 대한 I-V 특성을 나타내고 있다. Fig. 4(a)는 마이크로파가 인가되지 않았을 때 나타난 특성이고, Fig. 4(b)는 f_{rf}/f_p 가 3.44일 때 나타난 특성이다. Fig. 4(a)에서 평균 임계전류 ($\langle I_c \rangle$)는 198 μ A이고, 임계전류 분포 ($\Delta I_c / \langle I_c \rangle$)는 대략 $\pm 11\%$ 이다. 모든 접합들의 갭전압은 5.2 V로 한 개 접합당 2.6 mV의 갭전압을 갖고 있다고 볼 수 있다. 그리고, 85.9 GHz의 마이크로파에서는 2.4 V까지 정전압 스텝이

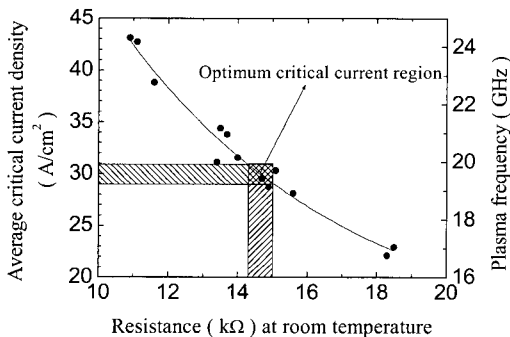
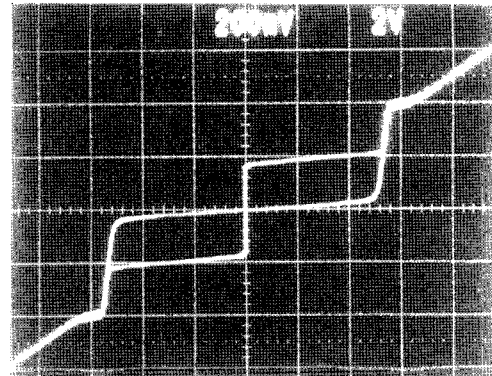
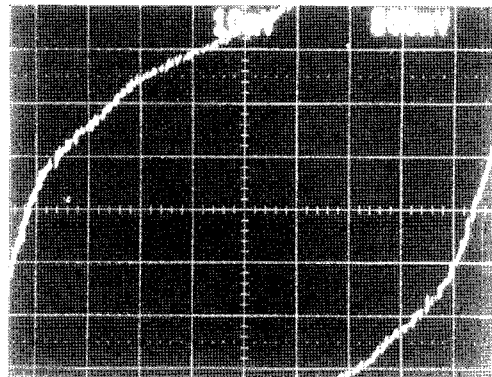


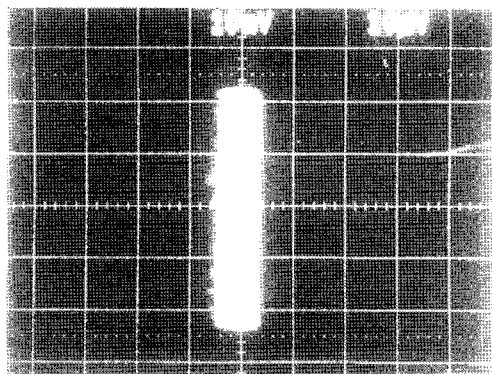
Fig. 3. Average critical current density vs Resistance measured at room temperature. The solid line is only guide for the eyes.



(a)



(b)



(c)

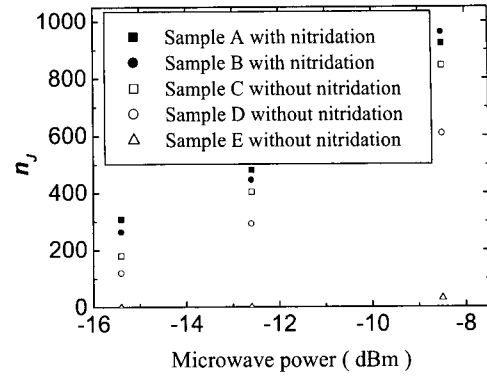
Fig. 4. I-V curves of (a) 2,000 Josephson junction array without microwave irradiation and with microwave irradiation of (b) 85.9 GHz. In particular, (c) shows a constant voltage step near 1.2 V. (a) horizontal scale: 2 V/div, vertical scale: 200 μ A/div. (b) horizontal scale: 500 mV/div, vertical scale: 10 μ A/div. (c) horizontal scale: 10 μ V/div, vertical scale: 10 μ A/div.

나타났다 (Fig. 4(b)). 이것은 인가된 마이크로파에 대해서 한 개 접합당 1.2 mV까지 정전압 스텝이 나타난다고 볼 수 있다. 그리고, 1.2 V 근방의 스텝크기는 대략 45 μ A로 조사되었다 (Fig. 4(c)).

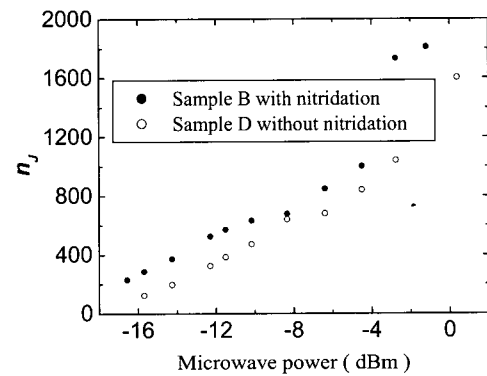
2. 질소 플라즈마 처리된 조셉슨 접합 어레이의 마이크로파 특성

1 V 어레이보다 더 정밀한 제작기술을 요하는 10 V 수준의 16,000 개 조셉슨 접합을 개발하기 위해서는 stripline에서 마이크로파 감쇄가 최소화되어야 한다. 마이크로파에 영향을 미칠 수 있는 Nb 박막 (ground-plane)에 대해 질소 플라즈마 처리를 해서 그 효과를 알아보았다. 즉, 질화처리된 ground-plane으로 제작한 것과 질화처리 하지 않은 ground-plane으로 제작한 조셉슨 접합 어레이에 대해 마이크로파 전송특성을 비교하였다. 마이크로파가 조셉슨 접합 어레이에 인가됐을 때 임계전류가 20 % 만큼 축소되는 지점의 전압을 그 어레이의 갭전압으로 나눠 마이크로파를 수신한 접합수를 구하였고, 마이크로파는 Gunn diode oscillator에 연결된 감쇠기 (attenuator)의 눈금을 전력측정기 (HP 437B)로 측정하였다. Fig. 5은 마이크로파에 반응한 접합수를 나타내고 있다. 여기서 사용된 sample A~D는 Fig. 4와 같은 특성을 갖는 소자이고, sample E는 2,000 개 조셉슨 접합 중에 1~2 개 접합에서 누설전류가 큰 접합을 갖고 있는 소자이다. 그리고, Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)에서 조사한 시료 중에 sample B와 D에 대해서 좀더 상세히 증가시켜 조사한 것이다.

Fig. 5에서 나타낸 것처럼 두 가지 방식으로 제작된 조셉슨 접합 어레이의 마이크로파 전송특성의 차이가 크게 나타나지는 않았지만 질화처리한 조셉슨 접합 어레이에서 같은 마이크로파에 대해서 반응한 접합수가 증가하는 것으로 조사되었다. 이것은 ground-plane 위에 300~320 $^{\circ}$ C에서 1 μ m 두께의 산화막을 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition)로 증착하는 동안에 질화처리 하지 않은 Nb 박막에 산소가 확산되어 Nb 박막의 초전도성을 열화시켜 질화처리 하지 않은 ground-plane의 표면 임피던스와 질화처리한 ground-plane의 표면 임피던스에 차이로 나타난 현상이라고 생각된다.



(a)



(b)

Fig. 5. (a)(b) Measured relative attenuation to suppress the critical currents; n_j : number of junctions with suppressed critical currents determined from the I - V characteristics.

참고문헌 [14]에 따르면 산소침투로 인한 Nb 박막의 초전도 임계온도의 하락은 산소 1 % 함유량당 0.93 K 정도인 것으로 알려져 있다.

V. 결론

Self-aligning 기술과 반응성 이온 식각 기술을 사용하여 70~94 GHz의 마이크로파에 대해 2 V 이상의 정전압 스텝을 갖는 2,000 개 조셉슨 접합 어레이를 제작하였다. 우리가 사용한 공정기술은 다른 제작방법 보다 한 단계 또는 두 단계가 적은 공정기술로 조셉슨 접합 어레이를 제작하는데 그만큼 간편해지고 재현성을 갖게 되었다. 그리고, ground-plane을 질화처리 함으로써 마이크로파에 반응한 조셉슨 접합수가 증가하는 것으로 조사되었다. 이는 ground-plane

의 표면 임피던스의 차이로 나타난 현상이다.

참고문헌

- [1] M. T. Levinsen, R. Y. Chiao, M. J. Feldmann, and B. A. Tucker, "An inverse ac Josephson effect voltage standard," *Appl. Phys. Lett.*, 31, 776-778 (1977).
- [2] J. Niemeyer, J. H. Hinken, and R. L. Kautz, "Microwave-induced constant-voltage steps at one volt from a series array of Josephson junction," *Appl. Phys. Lett.*, 45, 478-480 (1984).
- [3] M. Gurvitch, M. A. Washington, H. A. Huggins, and J. M. Rowell, "Preparation and properties of Nb Josephson junctions with thin Al layers," *IEEE Trans. Magn.*, MAG-19, 791-794 (1983).
- [4] M. Gurvitch, M. A. Washington, and H. A. Huggins, "High quality refractory Josephson tunnel junctions utilizing thin aluminum layers," *Appl. Phys. Lett.*, 42, 472-474 (1983).
- [5] H. Kroger, L. N. Smith, and D. W. Jillie, "Selective niobium anodization process for fabricating," *Appl. Phys. Lett.*, 39, 280-282 (1981).
- [6] S. Morohashi, S. Hasuo, "Experimental investigations and analysis for high-quality Nb/Al-AlO_x/Nb Josephson junctions," *J. Appl. Phys.*, 61, 4835-4849 (1987).
- [7] S. I. Park, K.-T. Kim, Y. H. Lee and R. D. Lee, "Development of a high-quality Nb/Al-Oxide/Nb Josephson-junction array (0.1-V model) for a voltage standard," *J. Korean Phys. Soc.*, 26, 369-377 (1993).
- [8] S. I. Park, K.-T. Kim, and R. D. Lee, "All-niobium process for Josephson series array circuits," *IEEE Trans. Instru. Meas.*, 44, 241-244 (1995).
- [9] M. Maezawa, M. Aoagi, H. Nakagawa, I. Kurosawa, "Specific capacitance of Nb/AlO_x/Nb Josephson junctions with critical current densities in the range of 0.1-18 kA/cm²," *J. Appl. Phys.*, 66, 2134-2136 (1995).
- [10] R. L. Kautz, "On a proposed Josephson-effect voltage standard at zero current bias," *Appl. Phys. Lett.*, 36, 386-388 (1980).
- [11] R. L. Kautz, C. A. Hamilton, and F. L. Lloyd, "Series-array Josephson voltage standards," *IEEE Trans. Magn.*, MAG-23, 883-890 (1987).
- [12] R. Poepel, J. Niemeyer, R. Fromknecht, W. Meier, and L. Grimm, "1 and 10 V series array Josephson voltage standards in Nb/Al₂O₃/Nb technology," *J. Appl. Phys.*, 68, 4294-4303 (1990).
- [13] J. Niemeyer, J. H. Hinken, and R. L. Kautz, "Near-zero bias arrays of Josephson tunnel junctions providing standard voltage up to 1 V," *IEEE Trans. Instru. Meas.*, IM-34, 185-187 (1985).
- [14] W. DeSorbo, "Effect of dissolved gases on some superconducting properties of niobium," *Phys. Rev.*, 132, 107-123 (1963).